

УДК 621.745.3:66.041.34:665.6

## РЕКОМЕНДАЦИИ ПО МОДЕРНИЗАЦИИ МНОГОКАМЕРНОЙ ТРУБЧАТОЙ ПЕЧИ С ЦЕЛЬЮ ЛИКВИДАЦИИ ЗОН ПЕРЕГРЕВА И КОКСООБРАЗОВАНИЯ

<sup>1</sup>Иваненко А.Ю., <sup>1</sup>Яблокова М.А., <sup>1</sup>Пономаренко Е.А., <sup>2</sup>Грабская Н.В.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технический университет  
(технологический институт)», Санкт-Петербург, e-mail: marina.yablokova@gmail.com;

<sup>2</sup>ООО «Газпром переработка», Санкт-Петербург, e-mail: Gpp@gpp.gazprom.ru

Рассмотрена задача модернизации многокамерной трубчатой печи установки гидроочистки прямогонного бензина с целью снижения вероятности прогара труб змеевиков из-за перегрева и коксообразования. Предварительный поиск наиболее вероятных зон перегрева был осуществлен ранее путем проведения численного эксперимента с использованием программного комплекса Flow Vision. Для снижения коксообразования и, соответственно, повышения надежности работы печи необходимо обеспечить равномерность полей температур, скоростей и интенсивностей перемешивания в межтрубном пространстве радиационных камер печи. С целью устранения застойных зон рекомендуется изменить конфигурацию газового канала радиационных камер, создав в зоне горелок участок расширения газотока, а в зоне выхода – участок сужения. Подобную конфигурацию можно обеспечить, например, заложив огнеупорным кирпичом углы радиационных камер. Крайние (наиболее удаленные от горелок) 3–4 витка змеевиков при этом необходимо выполнить более компактными, расположив вертикальные ветви труб ближе друг к другу. Кроме того, для выравнивания полей скоростей в камере рекомендуется установить отбойную перегородку напротив горелок. Место установки отбойной перегородки – в конце участка расширения, ее длина – 0,3–0,4 от ширины камеры. Результаты численного моделирования радиационной камеры с измененной геометрией газового канала показали существенное выравнивание полей скоростей и температур по объему, значительное снижение максимальных значений температуры на крайних змеевиках, что существенно снижает вероятность отказа печи из-за прогара труб.

**Ключевые слова:** многокамерная трубчатая печь, перегрев металла, коксообразование, численный эксперимент, выравнивание полей скоростей и температур конструктивными методами, модернизация конструкции

## RECOMMENDATIONS FOR UPGRADING A MULTI-CHAMBER TUBE FURNACE TO ELIMINATE OVERHEATING AND COKING ZONES

<sup>1</sup>Ivanenko A.Yu., <sup>1</sup>Yablokova M.A., <sup>1</sup>Ponomarenko E.A., <sup>2</sup>Grabskaya N.V.

<sup>1</sup>St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University),

St. Petersburg, e-mail: marina.yablokova@gmail.com;

<sup>2</sup>Gasprom pererabotka, OOO, Saint-Petersburg, e-mail: Gpp@gpp.gazprom.ru

The problem of modernization of a multi-chamber tube furnace of a straight-run gasoline hydrotreating unit is considered in order to reduce the probability of burnout of coil pipes due to overheating and coke formation. A preliminary search for the most likely overheating zones was carried out earlier by conducting a numerical experiment using the Flow Vision software package. To reduce coke formation and, consequently, increase the reliability of the furnace, it is necessary to ensure uniformity of the temperature fields, speeds and mixing intensities in the inter-tube space of the furnace's radiation chambers. To eliminate stagnant zones it is recommended to change the configuration of the radiant cameras gas channel, creating in the zone of burners the extension portion of the duct, and in the area of the constriction. Such a configuration can be provided, for example, by laying a fire brick on the corners of the radiant chambers. The extreme (most distant from the burners) 3-4 items of coils should be made more compact, placing the vertical branches of the pipes closer to each other. In addition, to align the velocity fields in the chamber, it is recommended to install a breakout partition in front of the burners. The place of installation of the breakout partition is at the end of the extension section, its length is 0.3-0.4 of the width of the chamber. The results of numerical simulation of a radiant chamber with a modified gas channel geometry showed a significant alignment of the velocity and temperature fields by volume, a significant decrease in the maximum temperature values at the extreme coils, which significantly reduces the probability of furnace failure due to pipe burnout.

**Keywords:** multi-chamber tube furnace, metal overheating, coke formation, numerical experiment, alignment of velocity and temperature fields by structural methods, design modernization

На Атырауском нефтеперерабатывающем заводе при решении проблемы увеличения межремонтного пробега установки гидроочистки прямогонного бензина [1, 2] возникла задача модернизации многозональной коробчатой печи, которая служит для нагревания промежуточных продуктов до температуры реакции.

Подлежащая реконструкции многокамерная коробчатая печь была подробно описана нами ранее [3, рис. 1]. Радиационно-конвективная часть печи состоит из камеры конвекции и пяти камер радиации, в каждой из которых установлено по шесть топливных форсунок. Теплообменная поверхность печи представляет собой систему трубчатых

змеевиков, выполненных в виде вертикальных петель, по которым движется нагреваемая жидкость. Змеевики трубчатых печей работают в тяжелых условиях постоянного воздействия высоких температур и внутренних давлений. Основной причиной прогара труб является перегрев металла в местах коксовых отложений. Высокая температура поверхности трубопровода вызывает термическое разложение прилегающих к ней слоев жидкости с образованием кокса, отлагающегося на внутренней поверхности трубы. Интенсивность коксообразования зависит от температурного режима работы и от скорости движения продукта по трубам [4–6]. Чем выше температура и меньше скорость потока, тем интенсивнее коксообразование и выше вероятность прогара.

Ранее [3] была разработана математическая модель гидродинамики и теплопереноса в рассматриваемой печи, которая позволила рассчитать поля скоростей и температур в радиантных камерах и камере конвекции. В результате численного эксперимента с использованием программного комплекса Flow Vision [3] было установлено, что течение газов в радиантных камерах является крайне неравномерным. В центральной области образуется несколько вихревых зон, при этом факел раскаленных газов проходит по центральной части камеры и растекается по противоположной стенке. Это приводит к возникновению возвратного течения между вертикальной стенкой камеры и трубами змеевика. В результате вблизи труб, расположенных ближе к горелкам, формируется ярко выраженная застойная зона, простирающаяся до середины камеры. Скорости газа в застойной зоне чрезвычайно малы – менее 0,05 м/с.

Численный эксперимент [3] показал, что распределение температур в радиантных камерах также отличается большой неравномерностью. Наихудшие условия наблюдаются на вертикальных участках змеевиковых труб. Расчетные значения максимальных температур наружных стенок змеевиковых труб достигали 645 °С, минимальные значения составляли 514 °С. Результаты численного эксперимента отчетливо продемонстрировали, что в области расположения крайних труб температура в камере намного превышает среднюю. Возможен перегрев крайних труб, который может вызвать повышенное коксообразование на их стенках со всеми вытекающими негативными последствиями – прогаром и разрушением.

Цель исследования: выработка научно обоснованных предложений по модернизации газового тракта печи с целью снижения

перегрева труб и уменьшения опасности коксообразования. Необходимо было на основании сведений о выявленных ранее [3] застойных зонах, а также зонах перегрева труб змеевиков наметить пути реконструкции исследуемой печи с целью увеличения межремонтного пробега.

*Предложения по модернизации газового тракта печи с целью снижения перегрева труб и уменьшения опасности коксообразования*

Для снижения коксообразования и, соответственно, повышения надежности работы печи необходимо обеспечить равномерность полей температур, скоростей и интенсивностей перемешивания в межтрубном пространстве радиационных камер печи. С целью устранения застойных зон рекомендуется изменить конфигурацию газового канала камеры, создав в зоне горелок участок расширения газохода, а в зоне выхода – участок сужения. Подобную конфигурацию канала можно обеспечить, например, заложив огнеупорным кирпичом углы радиантных камер под 45° к стенке (рис. 1). Крайние (наиболее удаленные от горелок) 3–4 витка змеевиков при этом необходимо выполнить более компактными, расположив вертикальные ветви труб ближе друг к другу.

Кроме того, для выравнивания полей скоростей в камере рекомендуется установить напротив горелок отбойную перегородку. Место установки отбойной перегородки – в конце участка расширения; длина перегородки – 0,3–0,4 от ширины камеры (рис. 2).

С целью проверки предлагаемого решения был проведен численный эксперимент с использованием математической модели, описанной в статье [3], но с геометрией печи, измененной по варианту 1 (рис. 1) и по варианту 2 (рис. 2), то есть без отражательной перегородки и с установленной отражательной перегородкой.

Целью численных экспериментов является определение:

- максимальных температур на наружной стороне труб;
- неравномерности нагрева наружных стенок труб в радиантной камере коробчатой печи.

На рис. 3 и 5 показаны поля скоростей и температур для варианта 1, на рис. 4 и 6 – для варианта 2.

*Анализ результатов численного эксперимента по исследованию предлагаемых вариантов модернизации радиантной камеры*

Анализ результатов численного моделирования радиантной камеры с измененной

геометрией газового канала по двум рассмотренным вариантам позволил сделать следующие выводы.

Устранение резких переходов в канале камеры путем создания участков плавного расширения и сужения существенно уменьшает неравномерность газораспределения по сечению камеры (рис. 2) – зоны вихре-

вой крутки по сравнению с базовым вариантом [3] существенно уменьшены. Хотя и в этом случае присутствуют застойные зоны с малыми скоростями газа (рис. 3), их влияние на распределение температур (рис. 5) заметно меньше. Возможно, это объясняется большей интенсивностью перемешивания в газовой фазе.

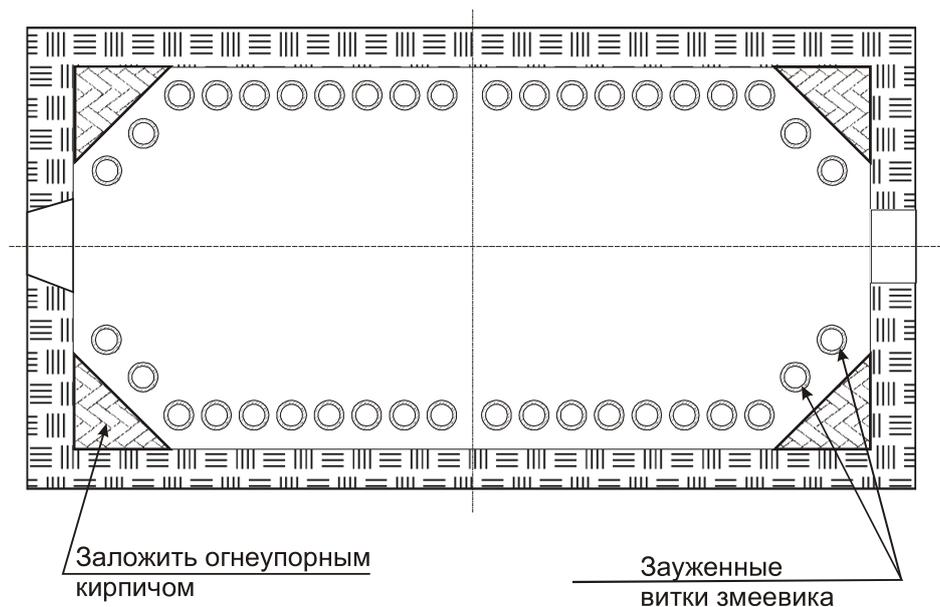


Рис. 1. Модернизированная камера трубчатой печи, вариант 1 (вид сверху)

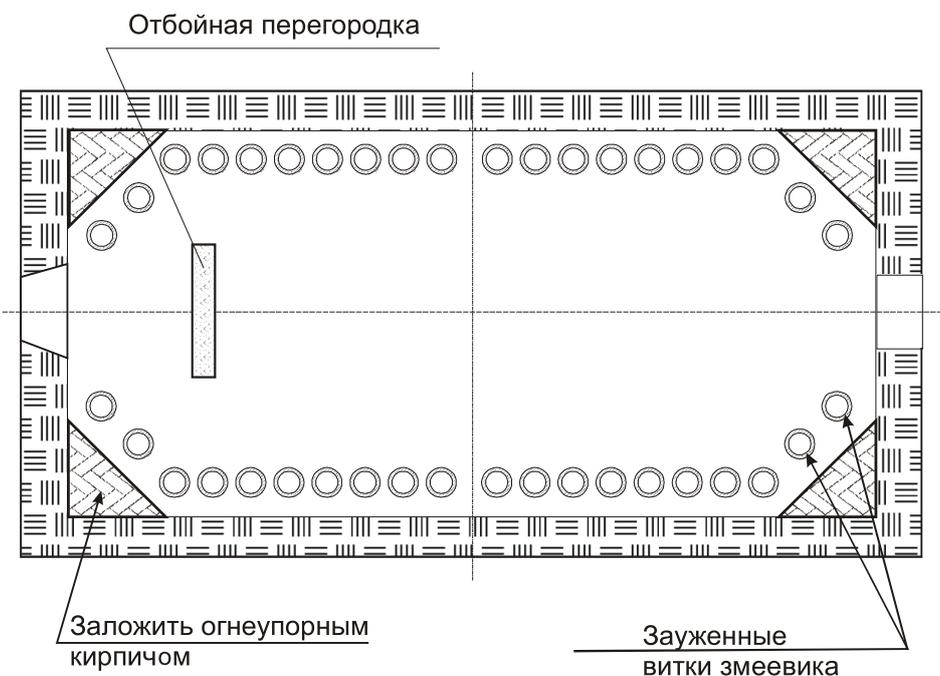


Рис. 2. Модернизированная камера трубчатой печи, вариант 2 (вид сверху)

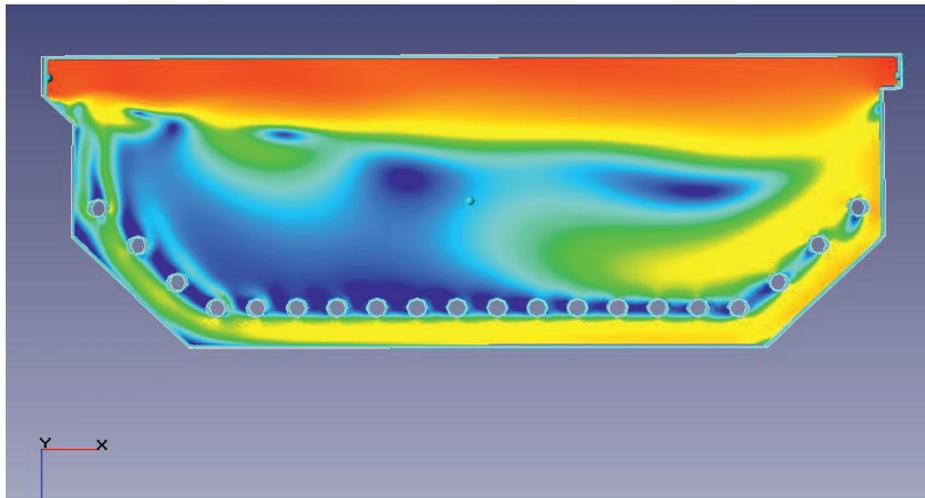


Рис. 3. Поле скоростей в горизонтальном сечении камеры (вариант № 1)

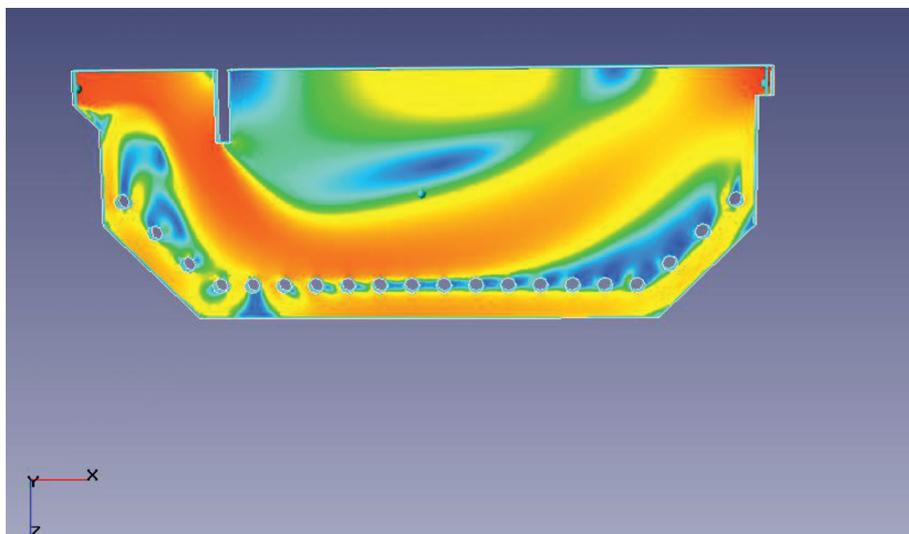


Рис. 4. Поле скоростей в горизонтальном сечении камеры (вариант № 2)

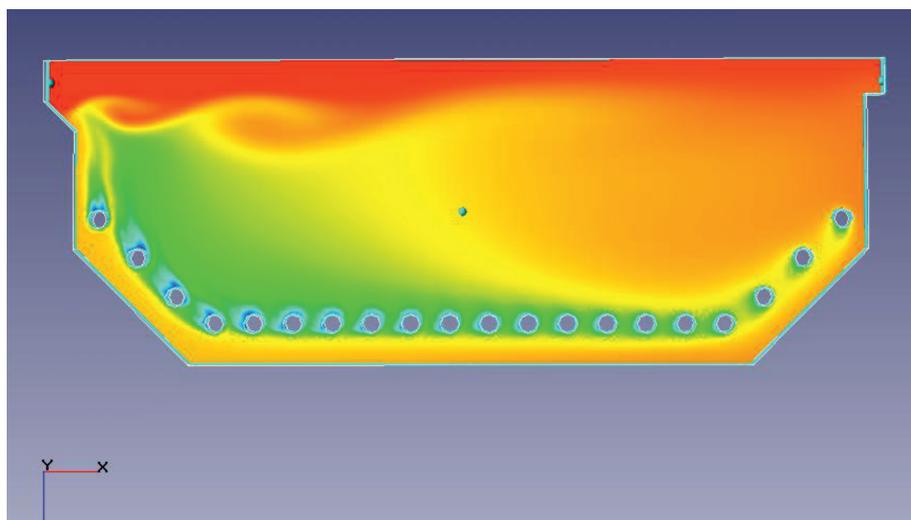


Рис. 5. Поле температур в горизонтальном сечении камеры (вариант № 1)

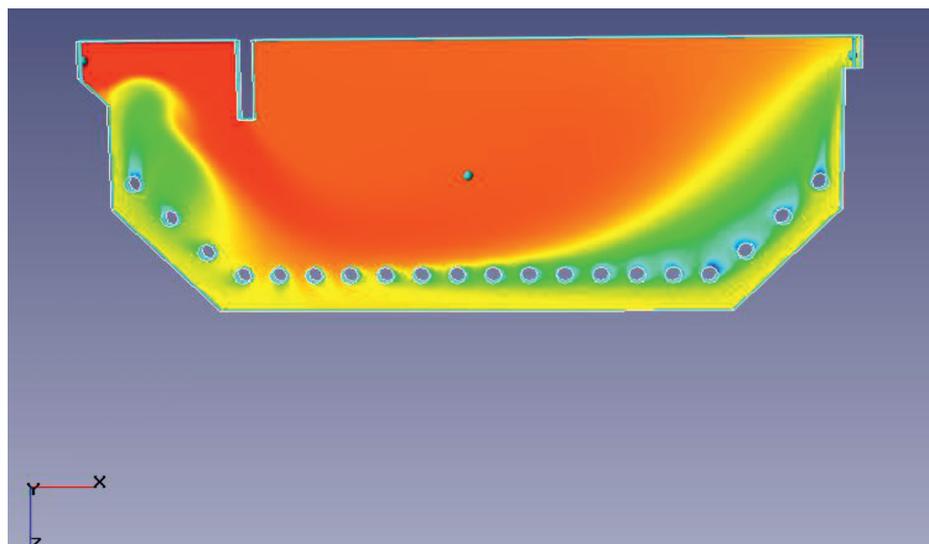


Рис. 6. Поле температур в горизонтальном сечении камеры (вариант № 2)

Значения максимальных и минимальных температур на стенках труб

	T max, °C	T min, °C
Базовый вариант конструкции печи [3, рис. 1]	645 °C – труба № 20	514 °C – трубы № 2–4
Вариант № 1 (рис. 1)	623 °C – труба № 20	522 °C – трубы № 1–3
Вариант № 2 (рис. 2)	615 °C – труба № 20	542 °C – трубы № 1, 17

Примечание. \*Нумерация труб – от горелок слева направо.

Установка отражательной перегородки поперек сечения камеры позволяет управлять течением газа гораздо в большей степени (рис. 4). Так, изменив направление газовой струи вдоль ряда змеевиковых труб, удастся существенно увеличить турбулизацию потока, что приводит к увеличению коэффициентов теплопереноса. Это, с одной стороны, уменьшает вероятность отложений углерода на наружной поверхности труб. С другой стороны, повышение интенсивности перемешивания в газовой фазе способствует выравниванию поля температур (рис. 6), что снижает возможный перегрев труб змеевика и, соответственно, вероятность коксования.

Ожидаемые значения максимальных и минимальных температур на стенках труб приведены в таблице.

### Заключение

По результатам математического моделирования и численного эксперимента, выполненного для различных вариантов геометрии радиантных камер, рекомендуется модернизация печи по варианту 2 с заделкой углов огнеупорным кирпичом и установкой отражательных перегородок напротив горелок.

*Работа выполнена при поддержке госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (785.00.X6019).*

### Список литературы

1. Казахстанские НПЗ перейдут на 3-летний межремонтный интервал // Портал Neftegaz.RU. 2017. 11 мая [Электронный ресурс]. URL: <https://neftegaz.ru/news/neftechim/210380-kazahstanskiye-npz-pereydu-t-na-3-letniy-mezhremontnyy-interval> (дата обращения: 12.02.2020).
2. В 3 руки. На Атырауском НПЗ дан старт пусковым работам на Комплексе глубокой переработки нефти // Портал Neftegaz.RU. 2017. 15 декабря [Электронный ресурс]. URL: <https://neftegaz.ru/news/neftechim/204650-v-3-ruki-natyrauskom-npz-dan-start-puskovym-rabotam-na-komplekse-glubokoy-pererabotki-nefti/> (дата обращения: 12.02.2020).
3. Иваненко А.Ю., Яблокова М.А., Пономаренко Е.А., Грабская Н.В. Математическое моделирование многокамерной печи установки гидроочистки бензина с целью определения зон перегрева и коксообразования // Современные наукоёмкие технологии. 2020. № 2. С. 12–19.
4. Халиков Р.А., Хазиахметов М.Ф., Оськин Ю.В. Дефекты трубчатых змеевиков печей нефтеперерабатывающих и нефтехимических установок // Химическая техника. 2015. № 9. С. 19–24.
5. Образцова Е.И. Оптимальное конструирование змеевика трубчатой печи при промежуточном отборе паровой фаз: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2004. 23 с.
6. Садиков А.И., Лосев Д.А., Селезнева А.А., Чепкасова О.А. Анализ характерных дефектов печей нагрева нефти по результатам технического диагностирования // Молодой ученый. 2015. № 22. С. 181–182. [Электронный ресурс]. URL <https://moluch.ru/archive/102/23308/> (дата обращения: 12.02.2020).